



La respirometría para el estudio de la influencia de la temperatura y el oxígeno en la nitrificación en un proceso de fangos activos

La influencia que el oxígeno y la temperatura ejercen en el proceso de la nitrificación es bien conocida y puede llegar a ser especialmente crítica cuando se trata de procesos que no pueden tener un tiempo de residencia hidráulica suficiente. Por ello, cuando uno de estos factores o ambos permanecen en valores relativamente bajos, el rendimiento de la nitrificación se puede ver sensiblemente afectado. El oxígeno normalmente es controlable, cosa que no ocurre con la temperatura. Sin embargo, es importante conocer la influencia del tándem temperatura-oxígeno ya que ambos van directamente ligados a la hora de ejercer sus efectos en la nitrificación. En este artículo, haciendo uso de un respirómetro de tecnología avanzada, se analiza esta influencia sobre la tasa de nitrificación y parámetros derivados de la misma. Con ello se da paso a la predicción de los efectos de estos dos factores en la tasa de nitrificación, y a seguir un procedimiento para calibrar el proceso en el marco de la optimización energética. Para una mejor comprensión, se describe brevemente el tipo de respirometría utilizada, así como los parámetros de la aplicación y un caso de estudio a modo de ejemplo.

Palabras clave

Respirometría, respirómetro, nitrificación, tasa de respiración, tasa de nitrificación, OUR (Oxygen Uptake Rate), AUR (Ammonium Uptake Rate), tiempo de residencia hidráulica.

BM RESPIROMETRY AS A TOOL FOR ANALYSIS AND CONTROL IN THE OXYGEN AND TEMPERATURE INFLUENCE ON THE NITRIFICATION OF AN ACTIVATED SLUDGE PROCESS

The influence that oxygen and temperature exert in the process of nitrification is well known. This influence comes to be especially critical when for processes that cannot have a sufficient hydraulic residence time. Therefore, when one of these factors or both remain in relatively low values, the nitrification efficiency can be appreciably affected. Oxygen is normally controllable, which does not normally occur with temperature. However it is important to know the influence of the tandem temperature-oxygen as both are directly linked when exerting its influence on nitrification. This article analyzes this influence on the nitrification rate making use of an exclusive respirometer of advanced technology, thus giving way to predicting the effects on the nitrification rate and following a procedure to calibrate the process of nitrification in the framework of energy optimization. For a better understanding, the respirometry utilized is briefly described, as well as the parameters of the application and a case study as example.

Keywords

Respirometry, respirometer, nitrification, respiration rate, nitrification rate, OUR (Oxygen Uptake Rate), AUR (Ammonium Uptake Rate), nitrification capacity, hydraulic residence time.

J. Emilio Serrano Soliveres
ingeniero técnico industrial,
administrador solidario
de Surcis



1. INTRODUCCIÓN

El proceso de nitrificación se fundamenta en fijar unas condiciones que permitan obtener una tasa de nitrificación lo suficientemente elevada como para alcanzar el rendimiento fijado en el marco de la mejor optimización energética posible.

Por lo efectos ya producidos en el proceso y su rendimiento, el jefe de planta suele conocer bien la influencia que produce el tándem temperatura-oxígeno. Sin embargo, aún siendo algo fundamental, normalmente no se conoce el efecto directo que estos parámetros ejercen sobre la tasa de nitrificación.

Para determinar de forma precisa la tasa de nitrificación se necesita un sistema de medida fiable que pueda realizar los ensayos a las distintas condiciones de temperatura, pH y oxígeno en las que el proceso puede operar, y todo ello se consigue con un respirómetro del tipo BM.

2. RESPIROMETRÍA BM

La tecnología de la respirometría BM se basa en un sistema único basado en una respirometría tipo LFS modificado. Esta tecnología permite que, en la programación previa del ensayo, e incluso durante la ejecución del mismo, se pueda adaptar a distintas condiciones de pH, temperatura, oxígeno y relación muestra/fango. También permite la posibilidad de introducción de determinados datos

FIGURA 1. Ventana de configuración de un ensayo en un respirómetro BM.



que pueden participar en los cálculos automáticos que se desarrollan a lo largo del mismo.

Opcionalmente, los respirómetros BM, mediante un reactor especial, también pueden desarrollar ensayos de respirometría con lechos bacterianos, para procesos tipo MBBR o de biomasa granular.

2.1. CARACTERÍSTICAS DEL RESPIRÓMETRO BM

Existen varios modelos de respirómetros BM, siendo descrito brevemente en este artículo el modelo Advance. Este respirómetro está dotado de un sensor de oxígeno disuelto exento de mantenimiento y pH, así como de un sistema automático de atemperación (frío-calor) construido en el propio analizador.

Todo el control del equipo se realiza desde el *software* cargado en el PC. Este *software* se puede actualizar y descargar directamente desde un determinado enlace de Internet. Los ensayos se programan desde

una página común. Esta programación comprende tanto los datos que se necesitan para los cálculos automáticos así como las condiciones de temperatura, pH, nivel de aireación...

En esta ventana se pueden seleccionar tres modos distintos de trabajo: OUR, OUR Cíclico y R (**Figura 1**).

- El modo OUR se basa en la respirometría tradicional (LSS) y consiste en la ejecución de un ensayo único de respirometría. Las medidas que se obtienen en el modo OUR son las que figuran en la **Tabla 1**. Cada una de estas medidas genera un respirograma que se visualiza de forma individual o conjunta.

- El modo OUR Cíclico consiste en una secuencia progresiva de medidas OUR en donde los valores del oxígeno disuelto (OD) se mueven dentro del el rango preestablecido de los puntos de consigna (OD bajo y OD alto). De este modo, se obtiene una serie secuencial de medidas del modo OUR.

- En el modo R, el sistema de medida puede considerarse como un único reactor *batch* con recirculación. Este modo se caracteriza por trabajar con pequeños volúmenes de muestra y, gracias a ello, minimizar la duración del ensayo para un importante paquete de medidas simultáneas que figuran en la **Tabla 2**.

TABLA 1

PARÁMETROS DE MEDIDA DEL MODO OUR Y POR CÍCLICO.

Parámetro	Medida
OUR	Tasa de respiración (mg O ₂ /L-h)
SOUR	OUR específico a VSS (mg O ₂ /g VSS-h)
SOUR parcial	SOUR en un tramo del ensayo
T	Temperatura (°C)

TABLA 2

PARÁMETROS DE MEDIDA DEL MODO R.

Parámetro	Medida
Rs	Tasa de respiración exógena (mg O ₂ /L·h)
Rsp	Rs específico (mg O ₂ /g VSS·h)
OC	Oxígeno consumido (mg O ₂ /L)
DQOb	DQO biodegradable total o soluble (mg O ₂ /L)
U	Tasa de eliminación de la DQOb (mg DQOb/L·h)
q	U específica (mg COD/mg VSS·d)
T	Temperatura (°C)
pH	Unidades de pH

Cada una de estas medidas genera un respirograma que se puede visualizar de forma individual o conjuntamente con cualquiera de una o varias de las medias que se están realizando de forma simultánea.

Otra importante faceta que ofrece el software BM es la opción de superponer varios respirogramas, incluyendo el de un posible ensayo en curso y su presentación de forma alineada.

Todos los analizadores BM de respirometría tienen la opción de trabajar con biomasa adherida a portadores sólidos como pueden ser lechos bacterianos o biomasa granular mediante la instalación de un reactor especialmente diseñado provisto de una jaula para los portadores de biomasa fija (*biomass-carriers*)

2.2. APLICACIONES DE LA RESPIROMETRÍA BM

Al tratarse de un sistema abierto, el número de aplicaciones derivadas de la respirometría BM puede ser ilimitado. Las aplicaciones más usuales son las siguientes: requerimiento de oxígeno y optimización energética; fracciones de la DQO; tratabilidad; biodegradabilidad; toxicidad global; toxicidad específica a la nitrificación; parámetros estequiométricos y cinéticos; capacidad de nitrificación; y DQO requerida para la desnitrificación.

3. ANÁLISIS Y CONTROL DE LA NITRIFICACIÓN PARA DISTINTAS TEMPERATURAS Y NIVELES DE OXÍGENO DISUELTO

Sin olvidar la depuración de la carga orgánica, normalmente el control del proceso y optimización energética en un proceso de depuración biológica con remoción de nitrógeno se debe centrar fundamentalmente en la nitrificación. La razón de ello es que el tratamiento biológico del amonio necesita unas condiciones más estrictas sobre oxígeno, pH, temperatura y parámetros operativos.

En los siguientes puntos se describen los parámetros y procedimientos fundamentales que pueden permitir un análisis en profundidad del efecto que pueden ejercer distintas temperaturas y valores de oxígeno disuelto en la velocidad de eliminación del nitrógeno amoniacal en el proceso de la nitrificación.

3.1. NITRÓGENO ACTUAL QUE EL PROCESO ESTÁ NITRIFICANDO

El nitrógeno actual que el proceso está nitrificando se calcula del siguiente modo:

$$N_n = NTK_a - NTK_e - N_{sin} \quad [1]$$

en donde:

- N_n = concentración de nitrógeno que se está eliminando (mg/L N).
- NTK_a = NTK del afluente a biológico (mg/L N).
- NTK_e = NTK en efluente.
- N_{sin} = nitrógeno utilizado en la síntesis de la biomasa nitrificante = 5% DBO eliminada.

El NTK es la suma del nitrógeno amoniacal más nitrógeno orgánico, por lo que la diferencia entre el NTK de entrada del de salida implica que el N_n sea nitrógeno amoniacal.

3.2. BIOMASA NITRIFICANTE ACTIVA

El método utilizado para obtener la concentración de biomasa activa nitrificante se basa en el hecho de que la respiración endógena es directamente proporcional a la concentración de biomasa.

La determinación de la tasa de respiración endógena de la biomasa nitrificante da paso al cálculo de la concentración de la biomasa nitrificante activa.

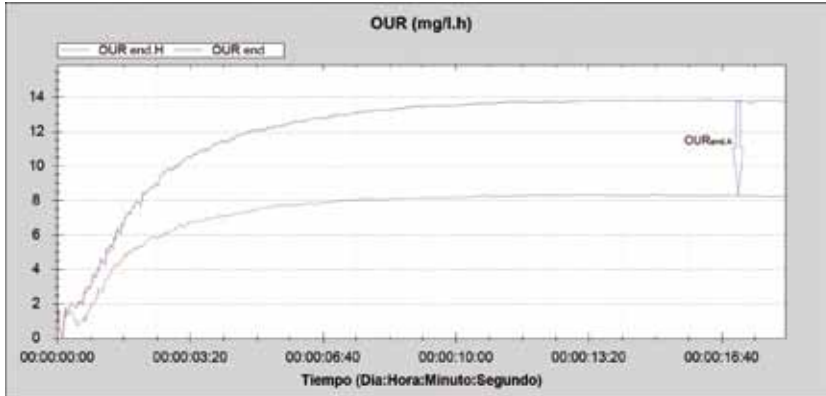
En primer lugar se determina la tasa de respiración endógena total. A continuación, mediante el uso de una dosis controlada alil-tiourea (ATU) con el fin de inhibir la actividad de la biomasa nitrificante en la respiración endógena, se lleva a cabo un nuevo ensayo para determinar la tasa de respiración endógena correspondiente a la biomasa heterótrofa (**Figura 2**).

La diferencia entre ambos resultados daría la tasa de respiración endógena de la biomasa nitrificante:

$$OUR_{end.A} = OUR_{end} - OUR_{end.H} \quad [2]$$



FIGURA 2. Superposición de ensayos OUR endógeno para la determinación del $OUR_{end.A}$



en donde:

- $OUR_{end.A}$ = tasa de respiración endógena de la biomasa nitrificante ($mg/L \cdot h O_2$).
- OUR_{end} = tasa de respiración endógena total ($mg/L \cdot h O_2$).
- $OUR_{end.H}$ = tasa de respiración endógena con biomasa nitrificante inhibida ($mg/L \cdot h O_2$).

Una vez se ha obtenido el valor de la respiración endógena de la biomasa nitrificante, se puede calcular el valor de la concentración de esta biomasa mediante la aplicación de la siguiente fórmula:

$$X_A = 24 * OUR_{end.A} / (f_{cv} * b) \quad [3]$$

en donde:

- f_{cv} = demanda de oxígeno por unidad de biomasa = 1,42 (O_2/VSS).
- b = tasa de decaimiento de la biomasa autótrofa en respiración endógena = $0,17 \times 1,04^{(T-20)}$ (d^{-1}).

3.3. TASA DE NITRIFICACIÓN A OXÍGENO ÓPTIMO

Para ello, se hace uso de un ensayo R utilizando una dosis cloruro de amonio con una concentración de nitrógeno amoniacal equivalente a

la del proceso actual (**Figura 3**). Este ensayo se programa a condiciones igualmente equivalentes de temperatura y pH. Una vez iniciado el ensayo, se deja correr hasta alcanzar el valor de tasa de respiración máxima (Rs_N).

El modo R de la respirometría BM se programa para que el fango endógeno se encuentre con un oxígeno de partida a nivel de saturación y para que, una vez se añade la dosis de cloruro de amonio y se alcance la tasa de respiración máxima, el oxígeno resultante de la mezcla quede con un valor dentro del rango óptimo para la nitrificación ($> 3 mg/L O_2$).

Con el valor de la tasa de respiración máxima, la tasa de nitrificación

correspondiente se calcula aplicando la siguiente fórmula matemática:

$$AUR' = Rs_N / 4,57 \quad [4]$$

en donde:

- AUR' = tasa de nitrificación a oxígeno óptimo ($mg/L \cdot h N$).
- Rs_N = tasa de respiración máxima por nitrificación ($mg/L \cdot h O_2$).

3.4. TASA DE NITRIFICACIÓN ACTUAL

A efectos de cálculo, se asume que la tasa de nitrificación actual se puede determinar por la relación entre el nitrógeno que se está nitrificando y el tiempo de residencia hidráulica aerobio del proceso:

$$AUR_{act} = Nn / Ta \quad [5]$$

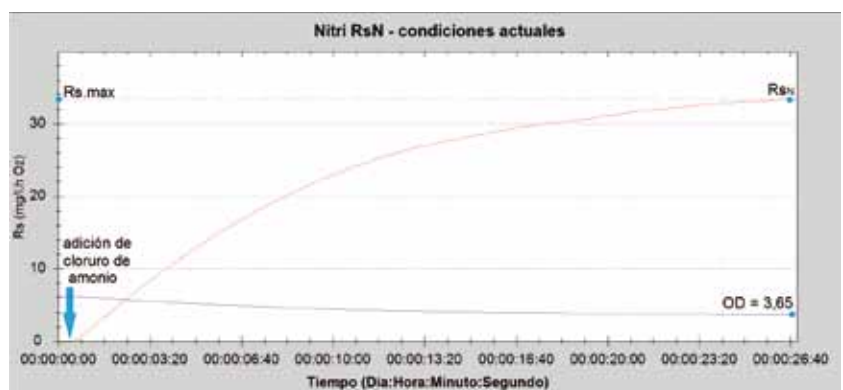
en donde:

- AUR_{act} = tasa de nitrificación actual ($mg/L \cdot h N$).
- Ta = tiempo de residencia aerobio en el reactor biológico (h).

3.5. CONSTANTE DE SEMISATURACIÓN POR OXÍGENO

Se trata de una constante ligada a la influencia que ejerce el nivel del oxígeno disuelto en los parámetros

FIGURA 3. Respirograma de ensayo R para la tasa de respiración por nitrificación (Rs_N).



cinéticos del proceso, entre los que se encuentra la tasa de nitrificación. Dada la gran influencia del oxígeno en la nitrificación, su valor es crítico, razón por la cual es muy importante que no se tomen alegremente valores por defecto de este coeficiente y que se calcule de forma precisa.

Sin embargo, no deja de ser curioso que tratándose de un parámetro tan importante, dependiendo de la fuente de información bibliográfica o programa, el valor por defecto de la K_{OD} pueda variar sensiblemente, como se muestra en la **Tabla 3**. En ella se observa que el valor más habitual es el de 0,5, por lo que, en el caso de que se tuviera que hacer uso de un valor por defecto, lo más aconsejable sería utilizar este valor.

El procedimiento para obtener la constante de semisaturación por oxígeno se basa en la cinética del proceso. Con ello, se puede relacionar AUR_{act} y AUR' del siguiente modo:

$$AUR_{act}/AUR' = OD_{act}/(K_{OD} + OD_{act}) \quad [6]$$

en donde:

- OD_{act} = oxígeno disuelto en el proceso actual (mg/L O_2).
- K_{OD} = coeficiente de semisaturación por oxígeno en la nitrificación actual (mg/L O_2).

Desde la ecuación [7] se despeja el valor del K_{OD} :

$$K_{OD} = OD_{act} * (AUR'/AUR_{act} - 1) \quad [7]$$

3.6. TASA DE NITRIFICACIÓN PARA UN DETERMINADO NIVEL DE OXÍGENO

Se refiere al cálculo de la tasa de nitrificación para un determinado nivel de oxígeno obtenida a partir de la relación tasa de nitrificación óptima corregida por un determinado nivel

TABLA 3	
VALORES DE K_{OD} SEGÚN DISTINTAS FUENTES.	
Fuente	K_{OD} (mg/L)
USEPA	1,3
IAW	0,4
BioWin	0,25
GPS-X	0,5
Beccari <i>et al.</i> (1999)	0,83
ASM1	0,4
ASM2	0,5
ASM3	0,5
Henze <i>et al.</i> (2000)	0,5
Contreras <i>et al.</i> (2008)	0,75

de oxígeno disuelto. Para ello se usa el mismo principio que en la ecuación [7], pero utilizando el oxígeno (OD) para el que se quiere calcular la tasa de nitrificación:

$$AUR = AUR' * OD/(K_{OD} + OD) \quad [8]$$

en donde:

- AUR = tasa de nitrificación para un determinado nivel de OD (mg/L·h N).
- OD = nivel de oxígeno disuelto

para el que se quiere calcular la tasa de nitrificación (mg/L O_2).

3.7. CAPACIDAD DE NITRIFICACIÓN

Se puede entender como capacidad de nitrificación de un proceso específico a la concentración de nitrógeno nitrificable que este es capaz de tratar en condiciones actuales con una determinada tasa de nitrificación durante el tiempo disponible para ello. Por tanto:

$$C_N = AUR * Ta \quad [9]$$

en donde:

- C_N = capacidad de nitrificación (mg/L N).

3.8. EDAD DEL FANGO MÍNIMA PARA LA NITRIFICACIÓN

La edad del fango para la nitrificación es la inversa de la tasa efectiva de crecimiento de la biomasa nitrificante:

$$TRC = 1/\mu_A \quad [10]$$

en donde:

- $\mu_A = 24 * Y_A * AUR/X_A$ = tasa de

TABLA 4		
DATOS RELEVANTES DEL PROCESO DE FANGOS ACTIVOS EN LAS CONDICIONES ACTUALES.		
Datos relevantes del proceso de fangos activos	Valores	Comentarios
N_N : valor del nitrógeno típico a nitrificar (mg/L)	27	Según fórmula [1]
SSVLM (mg/L)	2.190	-
TRC: edad del fango actual (d)	16	-
Ta: tiempo de residencia hidráulica aerobio (h)	5,6	Según ecuación [6]
OD: oxígeno disuelto (ppm)	1,8	Valor medio
Temperatura (°C)	20	Valor medio
Datos de partida desde resultados de respirometría BM	Valores	Comentarios
K_{OD} : coeficiente de semisaturación (mg/L O_2)	0,6	Según ecuación [8]
X_A : concentración biomasa nitrificante (mg/L)	240	Según ecuación [3]



crecimiento efectiva de la biomasa autótrofa (1/d).

4. EJEMPLO DE ANÁLISIS DE UN CASO REAL

Para una mejor comprensión de los parámetros que pueden identificar el estado del proceso de la nitrificación se describe un caso de estudio real a las temperaturas de 15 y 20 °C y un TRH efectivo relativamente corto en un reactor biológico con los datos de la **Tabla 4**.

4.1. TASAS DE RESPIRACIÓN POR NITRIFICACIÓN A 15 °C Y 20 °C A OXÍGENO ÓPTIMO

El parámetro de partida para cada caso es la tasa de nitrificación obtenida desde la tasa de respiración máxima por nitrificación a nivel óptimo de oxígeno (procedimiento del punto 3.3.). Los respirogramas correspondientes a estas tasas de respiración a distintas temperaturas se presentan en la **Figura 4**.

FIGURA 4. Respirogramas de las tasas de respirometría exógenas por nitrificación.

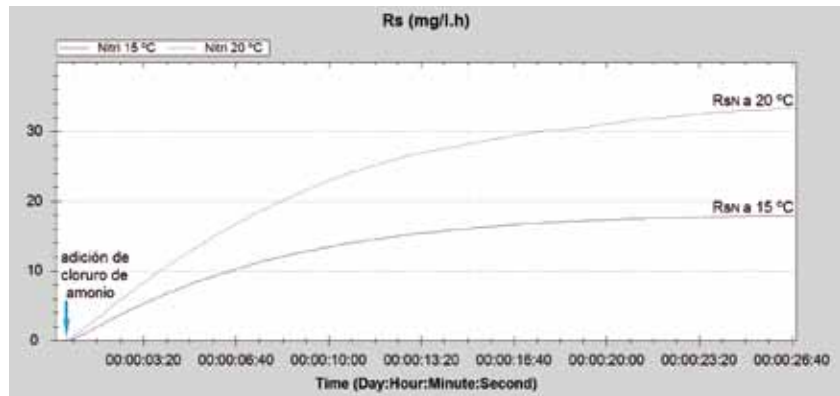


TABLA 5

RESULTADOS DE AUR Y C _N A 20 °C PARA DISTINTOS NIVELES DE OXÍGENO.		
OD (mg/L O ₂)	AUR' ₍₂₀₎ (mg/L·h N)	C _N (mg/L N)
> 3	7,22	40
OD ₍₂₀₎ (mg/L O ₂)	AUR ₍₂₀₎ (mg/L·h N) AUR = AUR' * OD / (K _{OD} + OD)	C _{N(20)} (mg/L N) C _N = AUR * Ta
0,7	3,88	21
1	4,51	25
1,5	5,15	29
2	5,55	31
2,5	5,82	32

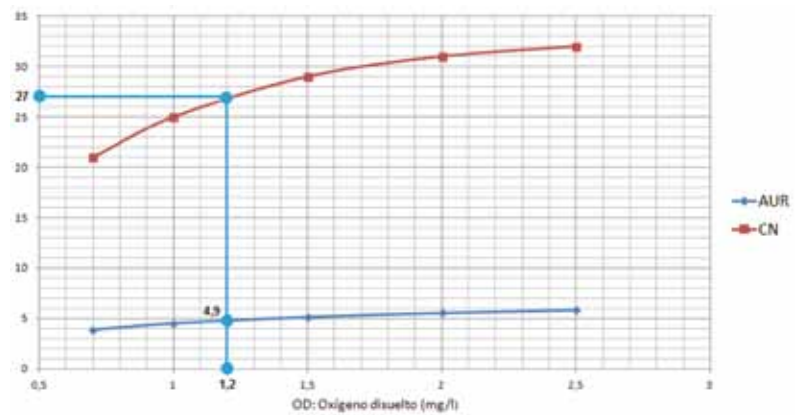
4.2. ANÁLISIS DE LA NITRIFICACIÓN A LA TEMPERATURA DE 20 °C

Una vez obtenida la tasa de nitrificación correspondiente (AUR') a partir de la tasa de nitrificación a 20 °C, se establece un determinado rango de oxígeno disuelto admisible por el sistema de aireación y, haciendo uso de las ecuaciones [8] y [9], se calculan los parámetros AUR y C_N para cada uno de los valores de oxígeno correspondiente. Los resultados obtenidos se muestran en la **Tabla 5**.

4.2.1. Determinación del nivel de oxígeno mínimo y edad del fango para nitrificar a 20 °C

La determinación del oxígeno mínimo tiene un enfoque dirigido a sentar una base para la fijación de un punto de consigna mínimo viable en

FIGURA 5. Gráficas de los valores del AUR y C_N para la determinación del oxígeno mínimo.



el control de la aireación con el fin de conseguir la mejor optimización energética.

Para ello se utiliza la **Tabla 5** con la que, mediante una hoja de cálculo, se confecciona la gráfica de la **Figura 5**, que permite ligar la capacidad de nitrificación (C_N) con el oxígeno

disuelto (OD), cuyo valor correspondiente al oxígeno mínimo con que la nitrificación podría operar para eliminar el nitrógeno nitrificable.

Haciendo uso de la gráfica C_N, se puede apreciar que el oxígeno mínimo para nitrificar una concentración de nitrógeno nitrificable de 27 (mg/L

N) es de 1,24 (mg/L); y que la tasa de nitrificación ligada a este valor es de 4,9 (mg/L·h N). Con ello, aplicando la fórmula [10], se calcula el valor de la edad del fango correspondiente. El resumen de los resultados obtenidos se presenta en la **Tabla 6**.

4.2.2. Conclusiones sobre el análisis de la nitrificación a 20 °C

La planta estaba operando a un nivel medio de oxígeno de 1,8 ppm, por lo que la reducción a 1,2 (mg/L) puede representar un importante ahorro energético, sentando la base para la programación de los puntos de consigna para el control del sistema de aireación del reactor biológico. La edad del fango, de momento, debe tener una ligera subida a 17 días.

4.3. ANÁLISIS DE LA NITRIFICACIÓN A LA TEMPERATURA DE 15 °C

Una vez obtenida la tasa de nitrificación correspondiente (AUR') a partir de la tasa de nitrificación a 15 °C (**Figura 4**), se establece el rango de oxígeno disuelto admisible por el sistema de aireación y, haciendo uso de las fórmulas [8] y [9], se calculan los parámetros AUR y C_N para cada uno de los valores de oxígeno correspondiente. Los resultados obtenidos se muestran en la **Tabla 7**.

4.3.1. Conclusiones sobre el análisis de la nitrificación a 15 °C

Con los resultados obtenidos se aprecia que en el proceso de la nitrificación a 15 °C, en el rango de oxígeno disuelto admisible y en las condiciones actuales, en ningún caso es capaz de nitrificar la concentración de nitrógeno prevista de 27 (mg/L N).

Resultados	Valores	Comentarios
OD _{min} (mg/L O ₂)	1,2	Según gráfica de la Figura 5
AUR (mg/L N)	4,9	Según gráfica de la Figura 5
TRC (d)	17	Según fórmula [10]

OD (mg/L O ₂)	AUR' ₍₂₀₎ (mg/L·h N)	C_N (mg/L N)
> 3	3,73	21
OD ₍₂₀₎ (mg/L O ₂)	AUR ₍₂₀₎ (mg/L·h N) AUR = AUR' * OD/K _{OD} + OD	$C_{N(20)}$ (mg/L N) $C_N = AUR * Ta$
0,7	2	11
1	2,33	13
1,5	2,66	14
2	2,87	16
2,5	3	17

4.3.2. Posible calibración del proceso de nitrificación para operar a 15 °C y a 2 mg/L de oxígeno

Asumiendo que el TRH no se puede modificar, el proceso de nitrificación a 15 °C necesitaría subir su tasa de nitrificación a un valor lo suficiente elevado como para abordar la eliminación de la concentración del amonio típico de 27 (mg/L N-NH₄).

Para ello, se debe tener en cuenta que la tasa de nitrificación es lineal con la concentración de biomasa nitrificante y, por lo tanto, de los SSVLM. Con ello, siempre que las características y condiciones del proceso lo permitan, la posible calibración del proceso puede pasar por incrementar la concentración de biomasa nitrificante y operar a un oxígeno de al menos 2 (ppm).

Por la **Figura 5** se conoce que la tasa de nitrificación requerida es de

4,9 (mg/L·h N-NH₄) y por la **Tabla 7** se sabe que el AUR que corresponde al oxígeno de 2 mg/L es de 2,87 (mg/L·h N-NH₄). Ello significa que para llegar a 4,9 se necesita un incremento del 72% de la tasa de nitrificación y, por lo tanto, de biomasa. Así, el valor actual de SSVLM de 2.190 mg/L se debería incrementar a 3.767 mg/L y, con ello, la biomasa nitrificante requerida pasaría de 236 mg/L a 406 mg/L. El resumen de la calibración requerida del proceso para 15 °C se presenta en la **Tabla 8**.

5. CONCLUSIONES FINALES

En este artículo se pone en evidencia que con unos pocos ensayos de respirometría BM es posible analizar en profundidad la capacidad de nitrificación de un proceso para distintos valores de oxígeno disuelto.

En el caso del ejemplo del proceso operando a 20 °C, con los datos ob-



TABLA 8

RESULTADOS PARA LA CALIBRACIÓN DE LA NITRIFICACIÓN A 15 °C CON UN OXÍGENO DE 2 MG/L.

OD (ppm)	SSVLM (mg/L)	X _A (mg/L)	TRC (d)	AUR (mg/L-h N)	C _N (mg/L N)
2	3.767	406	29	5,67	27


tenidos sería posible calibrar el proceso para conseguir una importante optimización energética.

En el caso del ejemplo del proceso operando a 15 °C, con los datos obtenidos no sería posible obtener el rendimiento suficiente como para eliminar el amonio típico a nitrificar. Sin embargo, cuando las condiciones lo permitan, se podría tener acceso a un procedimiento de calibración para que la nitrificación sea

capaz de eliminar el amonio típico a nitrificar en el marco de unas condiciones y parámetros operativos mínimos requeridos.

Bibliografía

- [1] Barnet, M.W. (1998). Dynamics and control of wastewater systems.
 [2] Eckenfelder, W.W. (1995). Activated sludge treatment of industrial wastewater.
 [3] Wentzel Mc & Ekama (2006). Characterization of municipal wastewater.
 [4] Young, J.C.; Cowan, R. (2004). Respirometry for environmental science and engineering.

- [5] Melcer, H. (2003). Methods of wastewater characterization in activated sludge modelling.
 [6] Van Haadel, A. (2007). Handbook biological wastewater treatment.
 [7] Harremoes, H.M. (1997). Wastewater treatment, second edition.
 [8] Metcalf & Eddy (2003). Wastewater engineering: treatment and reuse, 4th edition.
 [8] EPA Manual (2003). Biological nitrogen removal.
 [9] Sharman, R. (2003). Water and wastewater.
 [10] Guoqiangliu (2012). Nitrification performance of activated sludge under low dissolved oxygen conditions.
 [11] Surcis (2014). Using respirometry for energy optimization in a nitrifying biological wastewater treatment system.
 [12] Surcis (2018). BM Applications Manual. 

CONSULTE MÁS ARTÍCULOS
 TÉCNICOS Y OTRAS
 INFORMACIONES RELACIONADAS
 CON EL SECTOR DEL AGUA EN:
WWW.TECNOAQUA.ES